Л. С. БЕРМАН

ВАРИКАПЫ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 587

Л. С. БЕРМАН

ВАРИКАПЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.319.491
Б 50

Рассматривается физическая природа нелинейной полупроводниковой емкости — варикапа, а также зависимость емкости варикапа от напряжения и температуры, рабочий диапазон частот, изменение емкости при освещении.

Приведены примеры применения варикапов в различных схемах радиоэлектроники: электронная настройка колебательного контура, преобразование постоянного напряжения в переменное, параметрическое усиление электрических сигналов и фототоков.

Книга рассчитана на подготовленного радиолюбителя, знакомого с полупроводниковой техникой.

Варикапы.
Берман Лев Соломонович
М.—Л., издательство «Энергия», 1965.
40 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 587).
Сводный тематический план
«Радиоэлектроника и связь», 1965 г., № 187.

* * *

Редактор *Г. М. Веденеев* Техн. редактор *В. Н. Малькова*

Сдано в набор 28/VII 1965 г. Подписано к печати 28/X 1965 г.
Т-13 262 Бумага 84×108 1/32 2,1 печ. л., 1,91 уч.-изд. л.
Тираж 33 000 экз. Цена 8 коп. Заказ 523

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие полупроводниковой электроники идет как по пути улучшения параметров полупроводниковых приборов (диоды, транзисторы, фотоэлементы), так и по пути использования их в новых режимах. Полупроводниковые приборы по своим возможностям и многообразию режимов работы перспективнее электронных ламп. Примером тому могут служить многочисленные области применения полупроводниковых диодов. Полупроводниковые диоды используются не только для выпрямления переменного тока и детектирования сигналов высокой частоты (взамен кенотронов и ламповых диодов), но и для стабилизации напряжения (стабилитроны), для генерирования и усиления колебаний высокой частоты (туннельные диоды), для переключения тока в схемах автоматики (переключающие диоды) и т. д.

Полупроводниковый диод стали широко использовать и как управляемую емкость (варикап). Как известно, в качестве управляемой емкости можно использовать реактивные лампы. Однако варикапы могут работать на более высоких частотах, чем реактивные лампы, варикапы долговечнее и надежнее реактивных ламп, потребляют меньше энергии; схемы с варикапами проще, чем схемы с реактивными лампами. Варикапы успешно соперничают также с варикондами, так как последние

имеют ряд серьезных недостатков: сравнительно низкую добротность, сильную зависимость емкости от температуры, нестабильность во времени.

Варикапы применяются для параметрического усиления слабых сигналов, для электронной настройки контуров и фильтров, в счетных устройствах и во многих других схемах. Недавно были разработаны светочувствительные емкости (фотоварикапы), они используются для параметрического усиления слабых фототоков.

О принципе действия варикапов, их параметрах и основных областях их применения и рассказывает эта книга.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВАРИКАПОВ

1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЕМКОСТИ

Основой плоскостного диода является *p-n* переход, создаваемый в объеме полупроводника, т. е. тонкий переходный слой между областями с дырочной *p* и электронной *n* проводимостью. Толщина *p-n* перехода (обычно порядка нескольких микрон или нескольких десятых долей микрона) зависит от параметров полупроводника и от способа создания перехода. Переход *p-n* (рис. 1) может быть создан, например, путем вплавления индия в кристалл германия с проводимостью типа *n* (область *1*). При этом капля индия проплавляет на небольшую глубину германий и смешивается с ним (область *3*). Атомы индия из области *3* проникают на небольшую глубину в кристалл германия и образуют в нем тонкую область с проводимостью типа *p* (область *2*). При вплавлении переход от области *p* к области *n* получается резким.

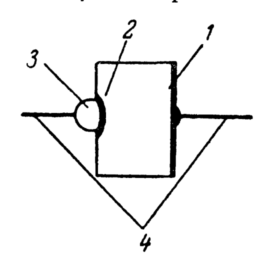


Рис. 1. Схематическая конструкция сплавного полупроводникового диода.
1 — *n*-германий (база диода); *2* — область *p*; *3* — сплав индия с германием; *4* — выводы.

Затем на область *n* наносится невыпрямляющий (омический) контакт, к которому припаивается вывод. Второй вывод припаивается к области *p*. После этого диод помещается в корпус.

Сплавные диоды имеют обычно небольшую площадь *p-n* перехода (как правило, не более нескольких квадратных миллиметров). Для создания *p-n* переходов

большой площади используется метод диффузии (медленного проникновения) в полупроводник примесей, находящихся в газообразном состоянии (процесс происходит при высокой температуре). Так, например, при диффузии фосфора в *p*-кремний на поверхности кремния образуется слой с *n*-проводимостью. Обычно при диффузии переход от области *p* к области *n* получается плавным.

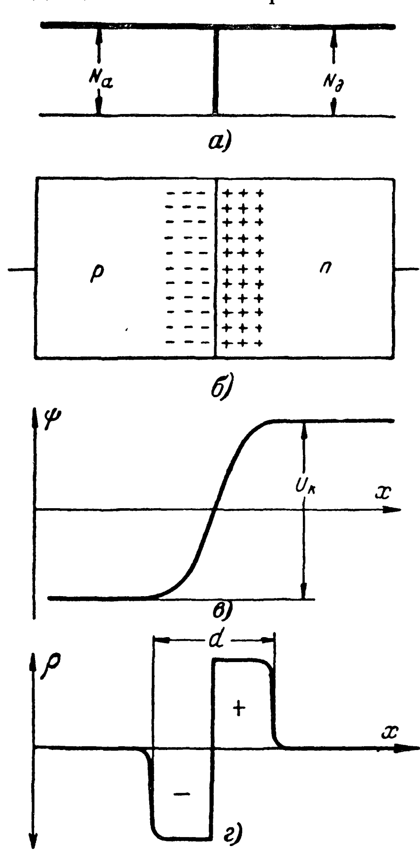


Рис. 2. Переход *p-n* при отсутствии внешнего напряжения.

а — распределение примесей в областях *p* и *n*; $N_а$ — концентрация примесей, создающих дырочную проводимость (акцепторы), $N_д$ — концентрация примесей, создающих электронную проводимость (доноры); *б* — двойной слой зарядов в *p-n* переходе (положительные заряды в области *n* и отрицательные заряды в области *p*); *в* — изменение потенциала ψ вдоль перехода; $U_к$ — высота потенциального барьера между областями *p* и *n*; *г* — плотность объемного заряда ρ; *d* — толщина *p-n* перехода.

Емкостные свойства плоскостного диода обусловлены наличием внутреннего электрического поля в *p-n* переходе. Рассмотрим причины образования этого поля. Пусть концентрация акцепторной $N_а$ и донорной примесей $N_д$ на границе областей *p* и *n* изменяется скачком (резкий *p-n* переход) — (рис. 2,*а*). Концентрация электронов в области *n* много больше, чем в области *p*. Поэтому электроны движутся в область *p*. Концентрация дырок в области *p* много больше, чем в области *n*. Поэтому дырки движутся в область *n*. Благодаря этому область *n* заряжается положительно, а область *p* — отрицательно (рис. 2,*б*).

Между областями *p* и *n* возникает разность потенциалов (так называемая контактная разность потенциалов $U_к$ или потенциальный барьер) и электрическое поле (рис. 2,*в*). Это поле направлено так, что оно отталкивает электроны внутрь области *n*, а дырки — внутрь области *p*, в результате чего между областями *p* и *n* образуется тонкий переходный слой (*p-n* переход), в котором почти нет свободных электронов и дырок. Отсутствие свободных электронов и дырок в *p-n* переходе приводит к тому, что заряд атомов примесей (доноры в области *n* и акцепторы в области *p*) оказывается нескомпенсированным. Однако атомы примесей прочно сидят на своих местах и не движутся под действием поля, в результате чего в *p-n* переходе образуется двойной слой зарядов: положительный заряд доноров в области *n* и равный ему по абсолютной величине отрицательный заряд акцепторов в области *p* (рис. 2,*г*). Эти заряды экранируют толщу областей *p* и *n* от электрического поля. Вне *p-n* перехода, т. е. в толще областей *p* и *n*, электрического поля нет: в области *n* положительные заряды доноров скомпенсированы зарядами свободных электронов, в области *p* отрицательные заряды акцепторов скомпенсированы зарядами дырок.

Пусть к диоду приложено обратное напряжение $U_{обр}$ с полярностью, показанной на рис. 3. В этом случае высота потенциального барьера между областями *p* и *n* возрастает на величину приложенного напряжения (рис. 3,*б*), возрастает также и электрическое поле в *p-n* переходе. Внешнее напряжение отталкивает электроны глубже внутрь области *n*, а дырки — глубже внутрь области *p*. В результате этого *p-n* переход запирается и через него пойдет только малый обратный ток. Атомы примесей (как уже указывалось выше) не движутся под действием поля; поэтому происходит расширение области переходного слоя (увеличивается толщина *p-n* перехода): увеличивается положительный заряд в области *n* и отрицательный объемный заряд в области *p* (рис. 3,*а* и *в*).

Пусть теперь к диоду приложено прямое напряжение $U_{пр}$ (рис. 4). В этом случае высота потенциального барьера между областями *p* и *n* уменьшается на величину приложенного напряжения (рис. 4,*б*), уменьшается также и электрическое поле в *p-n* переходе. Это облег-

чает прохождение электронов в область p и дырок в область n. Переход отперт, через него идет прямой ток. Толщина p-n перехода уменьшается: уменьшается положительный заряд в области n и отрицательный заряд в области p (рис. 4,*а* и *в*).

Таким образом, *изменение напряжения, приложенного к p-n переходу, приводит к изменению толщины p-n перехода и заряда в p-n переходе, т. е. p-n переход действует как емкость*. Эта емкость связана с образованием

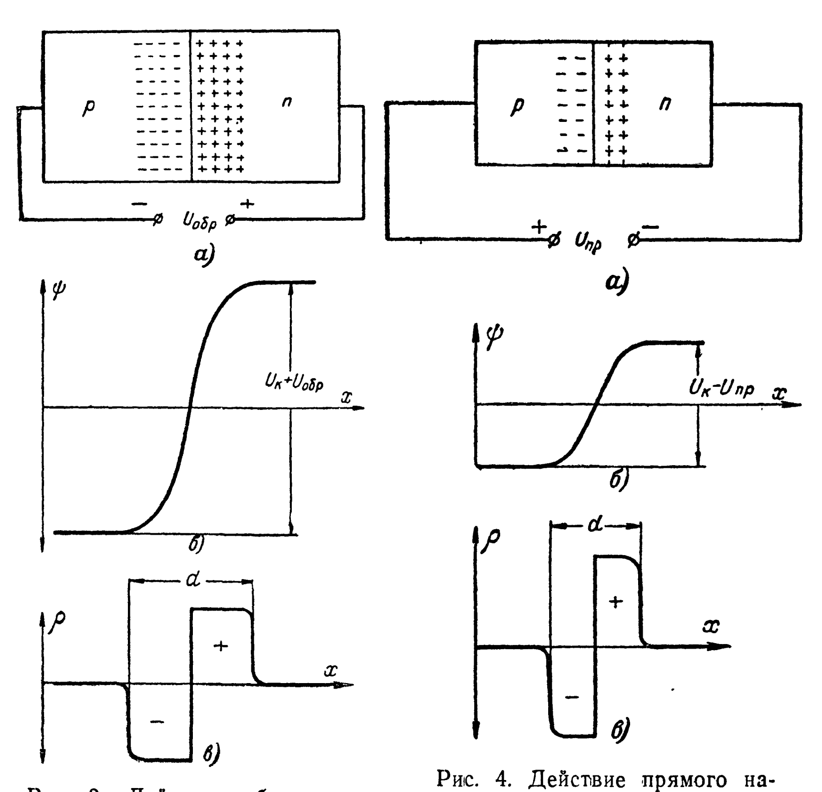


Рис. 3. Действие обратного напряжения на p-n переход.

а — двойной слой зарядов в p-n переходе; *б* — изменение потенциала ψ вдоль перехода; $U_к+U_{обр}$ — высота потенциального барьера между областями p и n; *в* — плотность объемного заряда ρ; d — толщина p-n перехода.

Рис. 4. Действие прямого напряжения на p-n переход.

а — двойной слой зарядов в p-n переходе; *б* — изменение потенциала ψ вдоль перехода; $U_к-U_{пр}$ — высота потенциального барьера между областями p и n; *в* — плотность объемного заряда ρ; d — толщина p-n перехода.

потенциального барьера между областями p и n, поэтому она называется *барьерной емкостью.*

Величина барьерной емкости может быть определена из формулы

$$C_б = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}, \qquad (1)$$

где $C_б$ — емкость, *см*;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

S — площадь p-n перехода, *см*^{2};

d — толщина p-n перехода, *см*.

Пусть, например, имеется p-n переход в германии (для германия $\varepsilon=16$), причем $S=1$ *мм*^{2} и $d=1$ *мк* (10^{-4} *см*). Используя формулу (1), получаем $C_б = 127$ *см* (или 140 *пф*).

Формула (1) аналогична формуле для емкости плоского конденсатора. Однако, несмотря на сходство этих формул, между барьерной емкостью и емкостью обычного конденсатора имеется принципиальное различие. В обычном конденсаторе расстояние между его пластинами, а следовательно, и его емкость не зависят от напряжения, приложенного к конденсатору. Толщина же p-n перехода зависит от величины приложенного к нему напряжения, следовательно, барьерная емкость зависит от напряжения: при возрастании запирающего напряжения толщина p-n перехода увеличивается, а его барьерная емкость уменьшается. Барьерная емкость нелинейна. Обратный ток запертого полупроводникового диода мал, т. е. мала проводимость, шунтирующая барьерную емкость; поэтому добротность барьерной емкости может быть высокой.

Если полупроводниковый диод отперт, то, кроме барьерной емкости, появляется *диффузионная емкость* (называемая так потому, что протекание прямого тока и возникновение при этом дополнительной емкости обусловлено диффузией электронов и дырок). Рассмотрим механизм возникновения диффузионной емкости. При протекании прямого тока электроны входят в область p, а дырки входят в область n. Приток дырок в область n создает там положительный заряд, одновременно в область n из внешней цепи входят электроны. Заряды

электронов компенсируют заряды дырок. Таким образом, в области *n* появляются положительный заряд дырок и равный ему по абсолютной величине отрицательный заряд электронов. При изменении прямого напряжения и прямого тока оба эти заряда изменяются, оставаясь равными один другому. Если *p-n* переход заперт, то оба эти заряда равны нулю. Аналогичные процессы происходят и в области *p*.

Таким образом, *при протекании прямого тока появляется диффузионная емкость*, обусловленная накоплением зарядов в областях *p* и *n* и изменением этих зарядов при изменении напряжения. *Диффузионная емкость нелинейна*; она резко возрастает при увеличении прямого напряжения. Полная емкость диода равна сумме барьерной и диффузионной емкостей. Диффузионная емкость шунтирована малым прямым сопротивлением отпертого *p-n* перехода, поэтому ее добротность мала (для диода она всегда меньше единицы). Добротность диффузионной емкости транзистора может быть выше, чем для диода, и может достигать нескольких единиц. Диффузионная емкость почти не применяется в схемах из-за ее низкой добротности и ряда других недостатков (сильная зависимость от температуры, высокий уровень шумов и др.). В дальнейшем будут рассматриваться параметры и применение барьерной емкости. Поскольку барьерная емкость нелинейна, то ее величина измеряется при малых переменных напряжениях (аналогично тому, как измеряются параметры транзистора).

2. ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТИ ВАРИКАПА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ

Зависимость барьерной емкости от постоянного напряжения. В настоящее время большинство варикапов на средние, высокие и сверхвысокие частоты изготовляется методом вплавления примесей в полупроводник. Для варикапов, изготовленных вплавлением, зависимость барьерной емкости от напряжения определяется по формуле

$$C_б(U) = \frac{k_1 S}{\sqrt{U + U_к}}, \qquad (2)$$

где $C_б(U)$ — барьерная емкость, соответствующая напряжению U;

k_1 — коэффициент, зависящий от параметров исходного полупроводника;
S — площадь *p-n* перехода;
U — обратное (запирающее) напряжение, приложенное к варикапу;
$U_к$ — высота потенциального барьера между областями *p* и *n* при отсутствии внешнего напряжения.

Для приближенных расчетов можно принять, что при комнатной температуре для германиевых *p-n* переходов

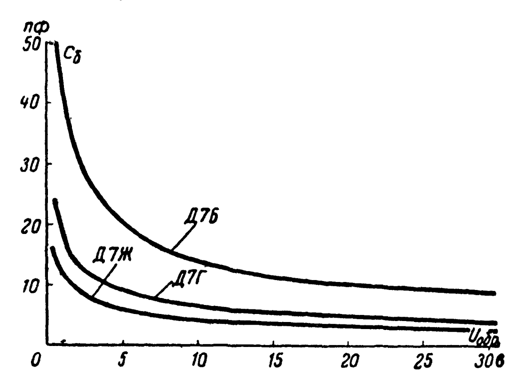


Рис. 5. Усредненные зависимости барьерной емкости от напряжения для германиевых диодов.

$U_к \approx 0{,}3 \div 0{,}5$ *в*, а для кремниевых *p-n* переходов $U_к \approx$ $\approx 0{,}5 \div 0{,}7$ *в*.

Если известно значение барьерной емкости при некотором напряжении U_1, то, пользуясь формулой (2), можно найти значение барьерной емкости при напряжении U_2:

$$C_б(U_2) = C_б(U_1)\sqrt{\frac{U_1 + U_к}{U_2 + U_к}}. \qquad (3)$$

Пусть, например, для германиевого диода при $U_1 = 1$ *в* $C_б(1) = 20$ *пф*. Требуется найти значение $C_б$ при $U_2 =$ $= 10$ *в*. Приняв $U_к \approx 0{,}4$ *в* и использовав формулу (2), получим $C_б(10) = 7{,}4$ *пф*.

Для ориентировки приводим усредненные зависимости барьерной емкости от напряжения (рис. 5) для германиевых диодов ДГ-Ц22 (Д7Б), ДГ-Ц24 (Д7Г) и

ДГ-Ц27 (Д7Ж), а также значение емкости некоторых диодов при различных запирающих напряжениях (приложение 1).

Рабочий интервал напряжений варикапов. Когда обратное напряжение достигает некоторого критического значения, обратный ток резко возрастает. Это значение напряжения называется пробивным. Максимальное напряжение на варикапе $U_{макс}$, очевидно, должно быть меньше пробивного напряжения $U_{пр}$ (значения $U_{макс}$ или $U_{пр}$ обычно приводятся в паспорте диода). С другой стороны, рабочий интервал напряжений ограничен напряжением, близким к нулю, при котором емкость шунтируется сопротивлением отпертого диода и ее добротность резко уменьшается. Для германиевых варикапов обратное напряжение должно быть не менее 0,2—0,3 *в*. Кремниевые варикапы могут иметь высокую добротность и при малых прямых напряжениях (порядка 0,1 *в*).

Глубину изменения емкости варикапов в рабочем интервале напряжений удобно характеризовать коэффициентом перекрытия, который равен отношению максимального значения барьерной емкости к ее минимальному значению. Приняв, что в рабочем интервале напряжений $0 \leqslant U \leqslant U_{макс}$, и использовав формулу (3), получаем формулу для коэффициента перекрытия:

$$K_п = \frac{C_{б.\,макс}}{C_{б.\,мин}} = \sqrt{\frac{U + U_к}{U_к}}, \qquad (4)$$

где $C_{б.макс}$, $C_{б.мин}$ — соответственно максимальное и минимальное значение барьерной емкости.

Пусть, например, в кремниевом варикапе $U_{макс} = 20$ *в* и $U_к = 0{,}6$ *в*, тогда из формулы (4) получаем $K_п \approx 5{,}9$.

Заметим для сравнения, что в конденсаторах переменной емкости, применяемых в радиовещательных приемниках, коэффициент перекрытия может быть порядка 25—30 ($C_{макс} \approx 450 \div 540$ *пф* и $C_{мин} \approx 10 \div 17$ *пф*).

Во многих случаях важно знать относительное изменение емкости при изменении напряжения. Этот параметр называется коэффициентом нелинейности $K_н$

$$K_н = \left| \frac{1}{C_б} \frac{\Delta C_б}{\Delta U} \right|, \qquad (5)$$

где ΔU — малое изменение напряжения на варикапе;
$\Delta C_б$ — малое изменение барьерной емкости, соответствующее изменению напряжения на ΔU.

Используя формулы (2) и (5), получаем:

$$K_н = \frac{1}{2(U + U_к)}. \quad (6)$$

Пусть, например, в германиевом варикапе $U_к = 0,4$ *в*. Тогда при $U = 1$ *в* получаем (выражая напряжение в милливольтах) $K_н = 0,36 \cdot 10^{-3}$ *мв*. При возрастании обратного напряжения коэффициент нелинейности уменьшается.

Для варикапов, изготовленных диффузией (при плавном изменении концентрации примесей в *p-n* переходе), зависимость барьерной емкости от напряжения определяется из приближенной формулы

$$C_б = \frac{k_2 S}{\sqrt[3]{U + U_к}}, \quad (7)$$

где k_2 — коэффициент, зависящий от параметров полупроводника и режима диффузии примесей.

Зависимость барьерной емкости от напряжения для кремниевых варикапов (рис. 6), изготовленных методом диффузии, хорошо согласуются с формулой (7). Из сопоставления формул (2) и (7) видно, что при плавном изменении концентрации примесей в *p-n* переходе нелинейность барьерной емкости меньше, чем для резкого *p-n* перехода; так, коэффициент нелинейности (при тех же значениях U и $U_к$) меньше в 1,5 раза. В схемах требуется, как правило, высокая нелинейность. Поэтому варикапы изготавливаются обычно с резким *p-n* переходом.

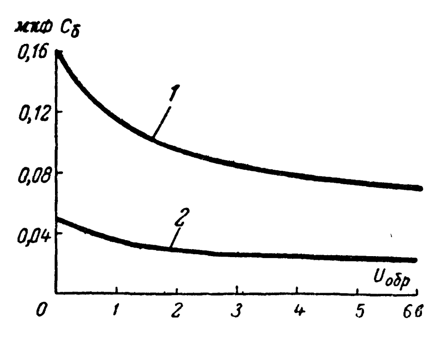


Рис. 6. Зависимость барьерной емкости от напряжения для низкочастотных кремниевых варикапов, изготовленных диффузией.

1 — площадь *p-n* перехода равна 7 *см²*; *2* — площадь *p-n* перехода равна 2 *см²*.

Параметры некоторых варикапов приведены в приложении 2.

Зависимость барьерной емкости от амплитуды переменного напряжения. Пусть к варикапу приложено некоторое постоянное напряжение $U_=$; при малых переменных напряжениях этому постоянному напряжению соответствует некоторое значение барьерной емкости $C_б(U_=)$.

Пусть к варикапу приложено также переменное напряжение

$$u(t)=U_\sim \cos \omega t.$$

При этом барьерная емкость будет периодически изменяться во времени с частотой приложенного напряжения (рис. 7). Зная зависимость емкости от времени (кривая

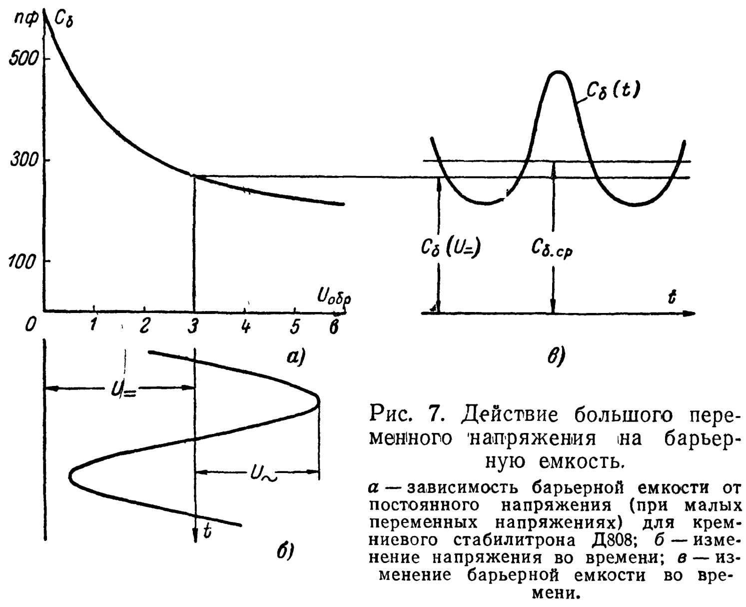


Рис. 7. Действие большого переменного напряжения на барьерную емкость.

а — зависимость барьерной емкости от постоянного напряжения (при малых переменных напряжениях) для кремниевого стабилитрона Д808; *б* — изменение напряжения во времени; *в* — изменение барьерной емкости во времени.

$C_б(t)$), можно найти постоянную составляющую емкости (ее среднее значение $C_{б.ср}$), первую и высшие гармоники изменения емкости. Как показывают расчеты (которые здесь не приводятся), первая гармоника тока, текущего через емкость I_{C1}, пропорциональна среднему значению емкости $C_{б.ср}$:

$$I_{C1}=\omega C_{б.ср} U_\sim. \tag{8}$$

Связь между средним значением емкости $C_{б.ср}$ и значением емкости при малых переменных напряжениях (при том же постоянном напряжении) $C_б(U_=)$ определяется из приближенной формулы

$$C_{б.ср} = C_б(U_=)\left[1 + \frac{3}{16}\left(\frac{U_\sim}{U_= + U_к}\right)^2\right]. \qquad (9)$$

Из формулы (9) видно, что при увеличении амплитуды переменного напряжения среднее значение емкости возрастает. При уменьшении амплитуды переменного напряжения среднее значение барьерной емкости стремится к ее «малосигнальному» значению.

Пусть, например, $U_= = 2$ *в* и $U_к = 0{,}5$ *в*, зададимся амплитудой переменного напряжения $U_\sim = 0{,}5$ *в*; пользуясь формулой (9), получаем $\frac{C_{б.ср}}{C_б(U_=)} = 1{,}03$, т. е. в данном режиме среднее значение емкости возрастает на 3% по сравнению с ее «малосигнальным» значением.

3. РАБОЧИЙ ДИАПАЗОН ЧАСТОТ

Барьерная емкость не зависит от частоты во всем радиотехническом диапазоне (вплоть до миллиметровых волн). Однако во всяком полупроводниковом диоде, помимо емкости, имеется сопротивление утечки $R_ш$ *p-n* перехода и последовательное сопротивление $R_п$, складывающееся из сопротивления материала полупроводника и сопротивления контактов. На рис. 8 приведена эквивалентная схема запертого полупроводникового диода.

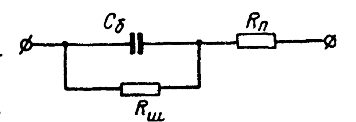


Рис. 8. Эквивалентная схема запертого полупроводникового диода.

$C_б$ — барьерная емкость *p-n* перехода; $R_ш$ — сопротивление утечки *p-n* перехода; $R_п$ — сопротивление материала полупроводника и контактов диода.

Значение барьерной емкости для различных типов варикапов лежит в пределах от десятых долей пикофарады (для диапазона сверхвысоких частот) до десятых долей микрофарады (для диапазона низких частот). Значение сопротивления $R_ш$ запертого *p-n* перехода обычно лежит в пределах от нескольких сотен килоом до нескольких десятков мегом. Значение последовательного сопротивления $R_п$ обычно лежит

в пределах от нескольких десятых долей ома до нескольких ом.

В схемах, как правило, требуется высокая добротность варикапа. На высоких частотах можно пренебречь шунтирующим действием сопротивления $R_ш$ *p-n* перехода. Тогда значение Q можно подсчитать по приближенной формуле

$$Q = \frac{1}{2\pi f C_б R_п}, \quad (10)$$

т. е. добротность убывает обратно пропорционально частоте.

На низких частотах можно пренебречь влиянием последовательного сопротивления диода $R_п$. Тогда добротности варикапа можно приближенно подсчитать по приближенной формуле

$$Q = 2\pi f C_б R_ш, \quad (11)$$

т. е. добротность возрастает пропорционально частоте.

Типичная зависимость добротности от частоты для высокочастотного варикапа показана на рис. 9 (в логарифмическом масштабе по обеим осям координат). Добротность варикапа может быть высокой — порядка нескольких сотен единиц и выше. Рабочий диапазон частот варикапа ограничен допустимым уменьшением его добротности. Задаваясь некоторым минимальным значением добротности $Q_{мин}$ (например, $Q_{мин}=10$), можно, пользуясь рис. 9 или формулами (10) и (11), определить верхнюю и нижнюю граничные частоты $f_в$ и $f_н$. Для приведенного примера $f_в = 180$ *Мгц* и $f_н=3,5$ *кгц*. Добротность варикапа максимальна при $f=700$ *кгц* и равна на этой частоте 1 100.

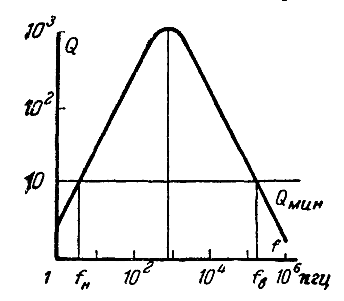


Рис. 9. Зависимость добротности высокочастотного варикапа от частоты.

$C_б=50$ *пф*, $R_п=2$ *ом*, $R_ш=10$ *Мом*.

Для работы в диапазоне звуковых частот нужны диоды с высоким сопротивлением утечки *p-n* перехода, т. е. с малыми обратными токами. Известно, что у кремниевых диодов обратные токи значительно меньше, чем

у германиевых (при одинаковой площади *p-n* перехода). Поэтому в качестве низкочастотных варикапов используются кремниевые диоды большой площади. У этих варикапов площадь *p-n* перехода примерно от 1 до 10 *см*^{2}.

Величина емкости на единицу площади *p-n* перехода (при отсутствии внешнего напряжения) $C_б(0) \approx \approx 0{,}02 \div 0{,}03$ *мкф/см*^{2}. Рабочий интервал напряжений: $U_{мин}=0$, $U_{макс}=5$ *в*. В этом интервале напряжений емкость варикапа изменяется примерно в 2 раза. Рабочий диапазон частот лежит в пределах от нескольких сотен герц до нескольких десятков килогерц.

В диапазоне частот от нескольких сотен килогерц до нескольких мегагерц в качестве варикапов можно использовать кремниевые стабилитроны — диоды Д808—Д817. Значения барьерной емкости стабилитронов того же порядка, как и емкости переменных конденсаторов, применяемых в радиовещательных приемниках. Коэффициент перекрытия $K_п$ для стабилитронов может колебаться в пределах 1,9—3,3 при изменении постоянного запирающего напряжения от 0,1 *в* до максимального напряжения $U_{макс}$, (последнее лежит в пределах 7—40 *в*).

Для диапазона частот от нескольких мегагерц до нескольких десятков мегагерц имеются варикапы серии Д901А — Д901Е (см. приложение 2). Кроме того, в этом диапазоне частот в качестве варикапов могут быть использованы плоскостные германиевые диоды Д7А — Д7Ж (ДГ-Ц21—ДГ-Ц27), а также переходы коллектор — база некоторых маломощных транзисторов. Параметры некоторых диодов и транзисторов, используемых как варикапы, приведены в приложениях 1 и 3.

При создании варикапов для диапазона сверхвысоких частот принимаются специальные меры по уменьшению последовательного сопротивления диода. У современных сверхвысокочастотных варикапов верхняя граничная частота лежит в диапазоне сантиметровых или миллиметровых волн.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТИ ВАРИКАПА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В формулы (1) и (2) для барьерной емкости входят два параметра, зависящие от температуры: относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника ε

и высота потенциального барьера $U_к$. При повышении температуры ε увеличивается, а $U_к$ уменьшается. Поскольку ε входит в числитель формулы для барьерной емкости, а $U_к$ — в знаменатель, то при повышении температуры барьерная емкость возрастает, т. е. температурный коэффициент емкости положителен (ТКЕ>0). В формулы для барьерной емкости входит величина $U+U_к$ (сумма запирающего напряжения и высоты потенциального барьера), поэтому при увеличении запирающего напряжения величина температурного коэффициента уменьшается. На рис. 10 показана типичная зависимость ТКЕ от запирающего напряжения. При обратных напряжениях порядка 10 *в* и выше ТКЕ порядка $(1\div2)\cdot10^{-4}$. Заметим для сравнения, что ТКЕ слюдяных конденсаторов лежит в пределах $\pm(0{,}5\div2)\cdot10^{-4}$.

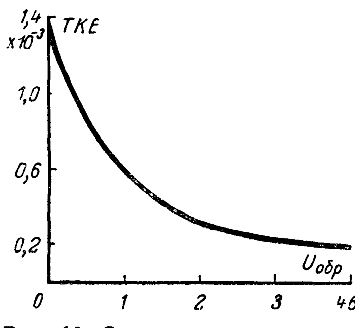


Рис. 10. Зависимость температурного коэффициента барьерной емкости от запирающего напряжения.

5. ФОТОВАРИКАПЫ

При определенных условиях емкость *p-n* перехода может изменяться под действием светового потока. Для этой цели могут быть использованы полупроводниковые фотодиоды. Напомним принцип действия полупроводникового фотодиода. В полупроводниковом фотодиоде *p-n* переход расположен близко к поверхности полупроводника (рис. 11,*а*). Свет, падающий на полупроводник, создает вблизи поверхности пары электрон — дырка. Большинство этих пар доходит до *p-n* перехода. Электрическое поле *p-n* перехода разделяет эти пары: электроны переходят в область *n*, а дырки — в область *p*. Благодаря этому при разомкнутых выводах в области *n* возникает отрицательный заряд, а в области *p* — положительный. Таким образом, при освещении между областями *p* и *n* возникает фото-э. д. с. $E_ф$. Очевидно, что при этом емкость *p-n* перехода изменится на такую же величину, как и при действии внешнего напряжения, равного по величине фото-э. д. с. Если замкнуть накоротко или

через сопротивление нагрузки выводы от областей p и n, то во внешней цепи пойдет фототок $I_ф$. Описанный режим работы фотодиода без внешнего напряжения, при-

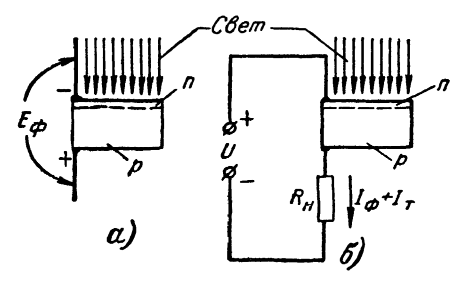


Рис. 11. Принцип действия фотоварикапа.

а — вентильный режим (холостой ход); *б* — фотодиодный режим.

ложенного к фотодиоду, называется *вентильным режимом.*

На рис. 12 показана типичная зависимость фото-э. д. с. (при разомкнутых выводах) для кремниевого фотодиода от мощности светового потока, падающего на фотоэлемент. При увеличении светового потока фото-э. д. с. возрастает сначала быстро, а затем медленно. Поэтому использование фотоварикапа в вентильном режиме на холостом ходу целесообразно при малых световых потоках, т. е. при быстром возрастании фото-э. д. с. от светового потока. На том же рисунке показана зависимость фототока (при короткозамкнутых выводах) от мощности светового потока.

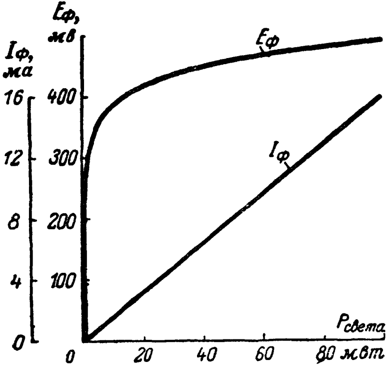


Рис. 12. Зависимость фото-э. д. с. и фототока короткого замыкания от мощности светового потока для кремниевого фотоварикапа (площадь фотоварикапа 1 *см*²).

Р — мощность светового потока (мощность 100 *мвт* на 1 *см*² соответствует яркому солнечному свету); $E_ф$ — фото-э. д. с. (холостой ход); $I_ф$ — фототок при коротком замыкании выводов.

Пусть теперь на фотодиод подано запирающее

напряжение U (рис. 11,*б*). Если фотодиод не освещен, то через него идет малый обратный ток $I_т$ (так же, как и в обычном полупроводниковом диоде); этот ток называется темновым. При этом обратное напряжение на фотодиоде U_1 равно:

$$U_1 = U - I_т R_н,$$

где $R_н$ — сопротивление нагрузки. Если фотодиод освещен, то к темновому току $I_т$ прибавляется фототок $I_ф$. При этом обратное напряжение на фотодиоде U_2 равно:

$$U_2 = U - (I_т + I_ф) R_н.$$

Таким образом, при освещении фотодиода обратное напряжение на нем изменяется на величину

$$U_1 - U_2 = I_ф R_н.$$

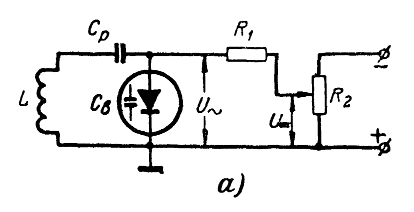
Очевидно, что при этом изменяется и емкость *p-n* перехода от значения, соответствующего напряжению U_1, до значения, соответствующего напряжению U_2. Описанный режим работы (с подачей запирающего внешнего напряжения) называется *фотодиодным режимом*. При повышении температуры темновой ток резко возрастает (так же, как и в обычном полупроводниковом диоде). Изменение темнового тока приводит к изменению падения напряжения на сопротивлении нагрузки $R_н$ (см. рис. 11,*б*), а следовательно, и к изменению емкости фотоварикапа. Поэтому использовать фотоварикапы в фотодиодном режиме целесообразно лишь тогда, когда фототок значительно превышает темновой ток. Параметры фотоварикапов приведены в приложении 4.

ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИКАПОВ

6. ЭЛЕКТРОННАЯ НАСТРОЙКА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Обычно колебательные контуры радиоприемников и радиопередатчиков настраиваются при помощи воздушных конденсаторов переменной емкости. При необходимости применять электронную настройку до сих пор использовались дроссели с переменной индуктивностью, вариконды и реактивные лампы. Однако громоздкость дросселей, низкая добротность варикондов и большое потребление энергии реактивными лампами препятствовали широкому внедрению электронной настройки.

Использование варикапов в этой области открывает возможность электронной настройки колебательного контура простыми и удобными техническими средствами. На рис. 13,*а* приведена схема включения варикапа в колебательный контур. Контур образован индуктивностью L и емкостью варикапа $C_в$. Разделительный конденсатор $C_р$ служит для того, чтобы индуктивность L не закорачивала варикап по постоянному току. Емкость конденсатора $C_р$ должна быть в несколько десятков или сотен раз больше емкости варикапа. В качестве варикапов в колебательных контурах радиоприемников могут быть использованы, например, кремниевые стабилитроны Д808—Д817.



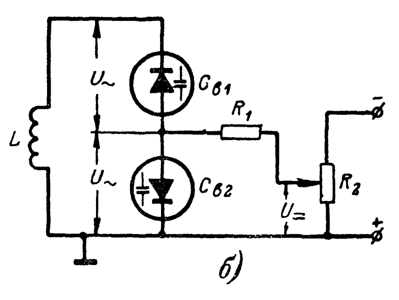


Рис. 13. Принципиальная схема электронной настройки колебательного контура.

Управляющее постоянное напряжение $U_=$ подается на варикап с потенциометра R_2 через высокоомный резистор R_1 (порядка одного или нескольких мегом), который не шунтирует колебательный контур. Благодаря малым обратным токам кремниевых стабилитронов падение напряжения на резисторе R_1 мало, и почти все управляющее постоянное напряжение $U_=$ приложено к варикапу. Перестройка контура осуществляется перемещением движка потенциометра R_2.

Если амплитуда напряжения высокой частоты одного порядка с постоянным напряжением, то напряжение высокой частоты расстраивает контур вследствие зависимости емкости от амплитуды переменного напряжения (см. § 2). Так, например, пусть величина барьерной емкости варикапа при $U_= = 3$ *в* и при малых переменных напряжениях равна 270 *пф* (рис. 7,*а*). Пусть теперь к варикапу приложено переменное напряжение с амплитудой, равной 2,5 *в*, при этом максимальное значение барь-

ерной емкости окажется равным 475 *пф*, а минимальное — 215 *пф*; среднее значение (за период переменного напряжения) будет равно 300 *пф* (рис. 7,*б*). Таким образом, в этом режиме среднее значение барьерной емкости увеличивается примерно на 10% по сравнению с ее значением без переменной составляющей, что приводит к уменьшению резонансной частоты контура примерно на 5%.

Включение варикапов по схеме, показанной на рис. 13,*б*, позволяет значительно уменьшить расстройку контура при действии переменного напряжения. В этой схеме варикапы включены по высокой частоте последовательно и, что самое главное, встречно. Благодаря встречному включению при любом изменении напряжения на контуре напряжение на одном из варикапов увеличивается, а на другом уменьшается. По постоянному напряжению варикапы включены параллельно. Пусть взяты те же варикапы и тот же режим работы, что и в предыдущем примере ($U_= = 3$ *в* и для каждого варикапа амплитуда переменного напряжения равна 2,5 *в*, т. е. амплитуда напряжения на контуре равна 5 *в*). При малых переменных напряжениях емкость контура вдвое меньше, чем емкость одного варикапа, т. е. равна 135 *пф*. При действии переменного напряжения емкость одного варикапа уменьшается, в то время как емкость другого увеличивается. В тот момент, когда переменное напряжение проходит через нуль, значения емкостей обоих варикапов одинаковы и равны 270 *пф* каждая; при этом емкость контура $C'_к = 135$ *пф*. В тот момент, когда переменное напряжение достигает своего амплитудного значения, емкость одного из варикапов равна 475 *пф*, а емкость другого 215 *пф*; при этом емкость контура

$$C''_к = \frac{475 \cdot 215}{475 + 215} = 148 \text{ пф}.$$

Таким образом, емкость контура изменяется с двойной частотой от 135 до 148 *пф*, а не от 215 до 475 *пф*, как в предыдущем примере. При этом среднее значение емкости контура равно примерно 138 *пф*. Таким образом, в описываемой схеме среднее значение емкости контура увеличивается примерно на 2% (а не на 10%, как в предыдущем примере), что приводит к уменьшению резонансной частоты контура примерно на 1%. Для умень-

шения ухода резонансной частоты нужно, чтобы амплитуда переменного напряжения не превышала нескольких десятых долей вольта (при постоянном напряжении порядка нескольких вольт).

Варикапы применяются также для автоматической электронной настройки контуров; например, для автома-

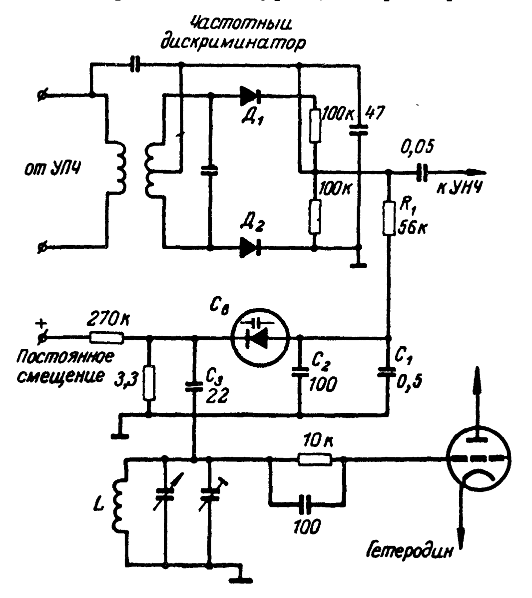


Рис. 14. Схема автоматической подстройки частоты с использованием варикапа.

тической подстройки частоты (АПЧ) гетеродина приемника частотно-модулированных сигналов в диапазоне ультракоротких волн (рис. 14). Разность частот гетеродина приемника и передающей радиостанции должна быть равна промежуточной частоте. Напряжение промежуточной частоты подается на частотный дискриминатор.

Постоянное напряжение с выхода частотного дискриминатора через фильтр R_1; C_1, C_2 подается на анод варикапа $C_в$, к другому выводу варикапа (катод) приложено запирающее постоянное смещение. По высокой частоте варикап включен в колебательный контур гете-

родина (через емкости C_2 и C_3). Благодаря малому обратному току варикап практически не нагружает частотного дискриминатора.

Если значение промежуточной частоты (при отсутствии частотной модуляции) равно номинальному, то постоянное напряжение на выходе дискриминатора отсутствует. Если же значение промежуточной частоты возросло (например, вследствие возрастания частоты гетеродина), то на выходе дискриминатора появляется положительное напряжение; при этом запирающее смещение на варикапе уменьшается, а емкость варикапа увеличивается. Увеличение емкости варикапа препятствует возрастанию частоты гетеродина.

Аналогично при уменьшении частоты гетеродина емкость варикапа уменьшается, что препятствует уменьшению частоты гетеродина.

В приведенной схеме в качестве диодов $Д_1$ и $Д_2$ можно использовать точечные германиевые диоды, предназначенные для детектирования высоких и сверхвысоких частот, например диоды серии Д1А—Д1Ж. В качестве варикапа здесь можно использовать точечный кремниевый диод Д101.

7. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПЕРЕМЕННОЕ

Малые переменные напряжения легче усиливать, чем малые постоянные. Поэтому преобразование малых постоянных напряжений в переменные широко применяется в усилительной технике. Устройство для преобразования постоянного напряжения в переменное с использованием варикапов не требует механических или иных преобразователей и транзисторов.

В основе преобразователя на варикапах лежит мостовая схема. Аналогичные схемы используются также для параметрических усилителей, усилителей фототоков, стабилизаторов напряжения и различных измерительных устройств.

Работа мостовой схемы. Плечами простейшего моста для низких частот (рис. 15,*а*) являются две одинаковые секции вторичной обмотки трансформатора *Тр* и два конденсатора C_1 и C_2. Через трансформатор *Тр* на мост

подано переменное напряжение с амплитудой $2U_{\sim}$ (иногда называемое напряжением раскачки) с частотой $f_р$.

Пусть вначале емкости конденсаторов в плечах моста равны, тогда мост будет сбалансирован, и в диаго-

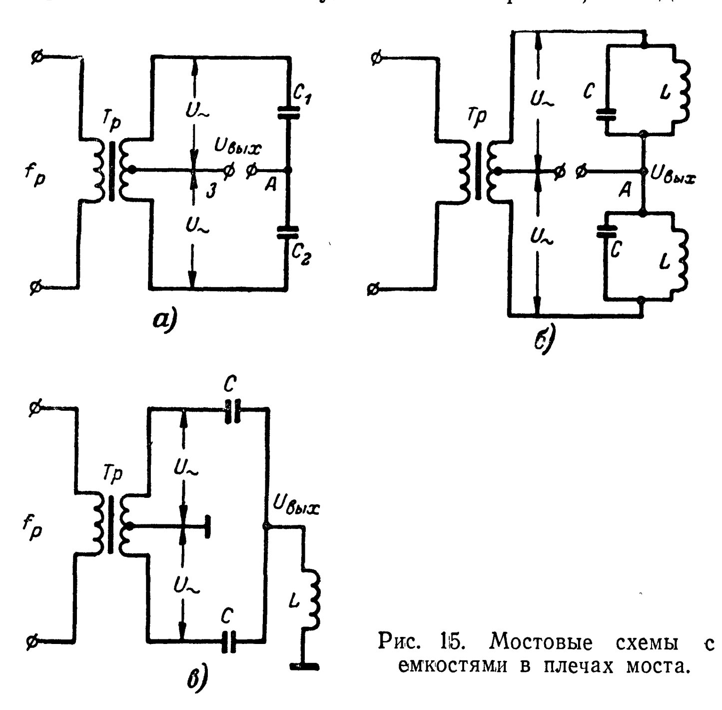


Рис. 15. Мостовые схемы с емкостями в плечах моста.

нали *А3* никакого переменного напряжения не будет. Если теперь в одном из плеч моста емкость изменится на величину ΔC, то баланс моста нарушится, и в диагонали моста появится переменное напряжение разбаланса

$$U_{вых} = \frac{1}{2} U_{\sim} \frac{\Delta C}{C}. \qquad (12)$$

Таким образом, напряжение на выходе моста при его разбалансе пропорционально амплитуде раскачки $U_{\sim}$ и относительному изменению емкости $\Delta C/C$. При изменении знака ΔC фаза напряжения $U_{вых}$ будет изменяться на 180°. Формула (12) справедлива при малых изме-

нениях емкости ($\Delta C \ll C$) и при условии, что мост не нагружен, т. е. сопротивление в диагонали моста значительно превышает сопротивление его плеч (последнее условие обычно выполняется, если нагрузкой моста является вход лампового усилителя).

Для повышения разбаланса мостовой схемы (при заданной амплитуде раскачки $U_{\sim}$ и относительном изменении емкости $\Delta C/C$) в плечи моста включают резонансные контуры (рис. 15,*б*). Пусть вначале эти контуры одинаковы и настроены на частоту раскачки $f_р$, при этом мост сбалансирован. При изменении емкости конденсатора в одном из плеч моста на величину ΔC напряжение разбаланса моста может быть найдено из формулы

$$U_{вых} = \frac{1}{2} Q U_{\sim} \frac{\Delta C}{C}, \qquad (13)$$

где Q — добротность резонансного контура. Остальные обозначения те же, что и для формулы (12). Таким образом, для мостовой схемы с резонансными контурами напряжение разбаланса в Q раз выше, чем для мостовой схемы с конденсаторами.

Иногда используется другой вариант резонансной мостовой схемы (рис. 15,*в*). В этой схеме катушка индуктивности L включена в диагональ моста. Условие настройки моста в резонанс на частоту раскачки определяется из формулы

$$f_р = \frac{1}{2\pi \sqrt{2LC}}. \qquad (14)$$

Напряжение разбаланса моста может быть найдено из формулы (13).

Схема преобразователя (рис. 16) по принципу ее действия аналогична схеме на рис. 15,*б*. Низкочастотные варикапы $C_{в1}$ и $C_{в2}$ образуют с индуктивностями L_1 и L_2 параллельные резонансные контуры, настроенные на частоту раскачки $f_р$. Блокировочные емкости $C_{бл1}$ и $C_{бл2}$ предохраняют варикапы от короткого замыкания по постоянному току через катушки L_1 и L_2. Сопротивление блокировочных емкостей для частоты раскачки мало.

Для уменьшения переменного напряжения на варикапе он присоединен к части катушки индуктивности. Емкости варикапов выбраны примерно равными. Для

компенсации разброса емкостей варикапов в одном из плеч имеется переменный конденсатор C_1. Для компенсации разброса потерь варикапов в одном из плеч моста имеется регулируемое сопротивление R_1.

При отсутствии постоянного входного напряжения $U_{вх}$ мост сбалансирован, и переменное напряжение

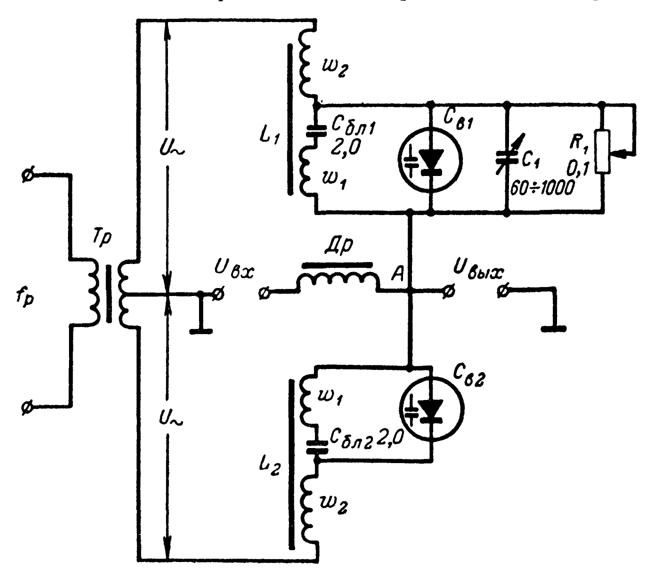


Рис. 16. Преобразователь постоянного напряжения в переменное с использованием варикапов.

$C_{в1}$, $C_{в2}$ — варикапы, барьерная емкость при нуле напряжения 0,16 *мкф*; L_1, L_2 — сердечник ОШ-12 из оксифера-400; w_1 — 50 витков, w_2 — 200 витков; *Др* — сердечник ОШ-20 из оксифера, 2 000, 5 000 витков; *Тр* — выходной трансформатор звукового генератора, $f_р = 10$ *кгц*, $U_\sim = 100 \div 150$ *мв*$_{действ}$.

$U'_{вых}$ отсутствует. Входное постоянное напряжение $U_{вх}$ (сигнал) подается на варикапы через разделительный дроссель *Др*. Варикапы включены таким образом, что входное напряжение для одного из них является прямым, а для другого обратным. Поэтому при подаче входного сигнала емкость одного из варикапов возрастает, а другого уменьшается, что приводит к появлению напряжения разбаланса $U'_{вых}$, которое пропорционально постоянному входному напряжению (при входных напряжениях до нескольких десятков милливольт). При

изменении полярности входного напряжения фаза напряжения разбаланса изменяется на 180°.

Источник входного сигнала нагружен лишь на сопротивление утечки двух варикапов, которое при малых прямых и обратных напряжениях обычно лежит в пределах от нескольких сотен килоом до нескольких мегом. Поэтому описываемая схема имеет высокое входное сопротивление.

Коэффициент передачи по напряжению (т. е. отношение $U_{вых}/U_{вх}$) может быть порядка одной или нескольких единиц,

Эквивалентное сопротивление контуров на частоте раскачки, являющееся выходным сопротивлением моста, много меньше, чем сопротивление варикапов по постоянному току. Следовательно, схема может быть нагружена на усилитель со сравнительно малым входным сопротивлением (порядка нескольких десятков килоом), при этом происходит значительное усиление по току.

Таким образом, описываемая схема не только преобразует постоянное входное напряжение в переменное, но и усиливает входной сигнал по мощности.

Достоинством описываемой схемы (помимо высокого входного сопротивления) является отсутствие механических прерывателей или транзисторов. Недостатком схемы является температурный уход нуля, т. е. возникновение напряжения разбаланса при изменении температуры (и при отсутствии входного сигнала).

Усиление будет происходить и при изменении входного сигнала с низкой частотой (много меньшей, чем частота раскачки). Такое усиление, обусловленное периодическим изменением емкости, называется параметрическим (см. также следующий раздел).

8. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

В настоящее время параметрические усилители широко используются для усиления слабых сигналов. Важным преимуществом параметрических усилителей является малый уровень собственных шумов.

Варикапы $C_{в1}$ и $C_{в2}$ с подстроечными конденсаторами C_1 и C_2 включены в плечи резонансной мостовой схе-

мы (рис. 17), настроенной на частоту раскачки $f_р$, которая выбирается много выше усиливаемой низкой частоты.

Эта схема по принципу действия аналогична схеме на рис. 15,*в*.

Варикапы включены таким образом, что при действии входного напряжения низкой частоты $U_{вх}$ емкость одного из них увеличивается, а емкость другого уменьшается. Батареи постоянного смещения $Б_1$ и $Б_2$ заблокированы для частоты раскачки емкостями $C_{бл1}$ и $C_{бл2}$.

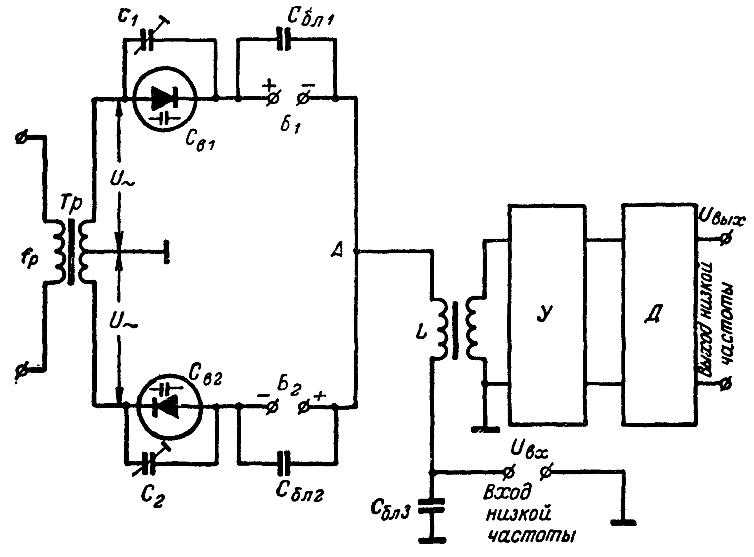


Рис. 17. Параметрический усилитель низкой частоты.

Блокировочная емкость $C_{бл3}$ служит для заземления катушки индуктивности L для частоты раскачки. Для источника входного сигнала низкой частоты эта емкость является высоким сопротивлением.

При отсутствии входного сигнала мост немного разбалансирован, т. е. в точке A имеется напряжение частоты раскачки. При действии входного сигнала происходит изменение емкости варикапов и, следовательно, большая или меньшая разбалансировка моста. В результате этого выходное напряжение моста модулируется с частотой сигнала. Затем это модулированное напря-

жение усиливается усилителем *У* и детектируется детектором *Д*. Напряжение низкой частоты на выходе детектора пропорционально входному сигналу. Поскольку напряжение разбаланса на выходе детектора отфильтровывается и не попадает в нагрузку, то величина разбаланса моста не критична. Механизм усиления по напряжению и по току в мостовой схеме был рассмотрен в предыдущем параграфе.

В описываемой схеме может быть достигнут меньший уровень собственных шумов, чем в ламповых или транзисторных усилителях низкой частоты.

9. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ ФОТОТОКОВ

Усиление фототоков с использованием фотоварикапов состоит в том, что фотоварикап включается в одно из плеч моста параметрического усилителя. Изменение светового потока, падающего на фотоварикап, приводит к изменению напряжения на *p-n* переходе и к изменению емкости *p-n* перехода, что в свою очередь приводит к появлению сигнала на выходе параметрического усилителя.

Напряжение раскачки $2U_{\sim}$ с частотой $f_{р}$ подается через трансформатор *Тр* на мостовую схему (рис. 18). Фотоварикап $C_{фв}$, блокировочная емкость $C_{бл}$ и индуктивность L образуют колебательный контур, который включен в одно из плеч мостовой схемы. При заданном запирающем смещении $U'_{=}$ и при отсутствии освещения этот контур настроен на частоту раскачки. В другое плечо моста можно включить колебательный контур с линейной емкостью, однако для упрощения схемы вместо колебательного контура включено сопротивление R_2, равное эквивалентному сопротивлению контура. Сопротивление нагрузки $R_{н}$ включено в диагональ моста через выпрямитель *В*.

Если фотоварикап не освещен, то мост сбалансирован. При освещении фотоварикапа фототок $I_{ф}$, проходящий по сопротивлению R_1, создает на нем падение напряжения $I_{ф}R_1$, что приводит к изменению запирающего смещения на фотоварикапе и к изменению емкости фотоварикапа. Как было описано выше, последнее приводит к разбалансу моста и появлению тока в сопротив-

лении нагрузки. Мощность, выделяемая при этом в сопротивлении нагрузки, значительно превышает мощность, выделяемую фототоком в сопротивлении R_1, т. е. описываемая схема является усилителем мощности фототока.

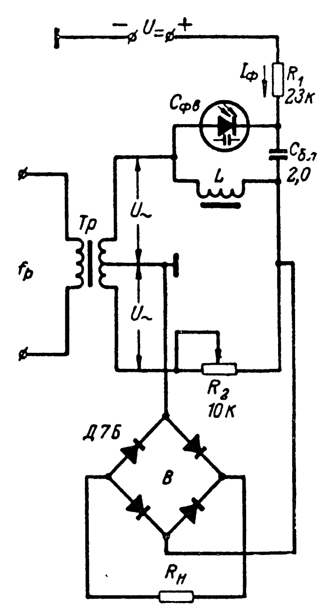


Рис. 18. Параметрический усилитель фототоков.

Тр — выходной трансформатор звукового генератора ($f_р \approx$ ≈20 *кгц*); $C_{фв}$ — фотоварикап (кремниевый фотоэлемент). Барьерная емкость 0,11 *мкф* (при $U_{=}=-4$ *в*); *L* — тороид 45×28×8 из оксифера М1500НМ-2; 24 витка.

В качестве фотоварикапов использовались кремниевые фотоэлементы площадью в несколько квадратных сантиметров, имеющие большую емкость и высокую добротность емкости на низких частотах. Однако эти фотоэлементы не рассчитаны на фотодиодный режим, у них сравнительно большие темновые токи. Кроме того, как диоды они весьма низковольтны, что ограничивает напряжение смещения и амплитуду раскачки несколькими вольтами.

Типичный режим работы описываемой схемы: $U_{=}=4\div5$ *в*; $U_{\sim}=1{,}5\div2{,}0$ $в_{действ}$; $R_н=500\div1\,000$ *ом*. При этом коэффициент усиления по мощности получается порядка 10—15. При фототоках порядка нескольких десятков микроампер может быть получена мощность выпрямленного тока в нагрузке порядка 1 *мвт*, что достаточно для срабатывания маломощного реле.

10. СТАБИЛИЗАЦИЯ МАЛЫХ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Зависимость емкости варикапа от постоянного напряжения может быть использована для стабилизации постоянных напряжений. Напряжение стабилизации стабилитронов, выпускаемых промышленностью, лежит в пределах 5,6—40 *в* (стабилитроны 2С156А, Д817).

При меньших напряжениях целесообразно использовать варикапы, тем более что при уменьшении постоянного напряжения коэффициент нелинейности варикапа увеличивается. Схема стабилизации постоянного напряжения; использующая варикапы, приведена на рис. 19. Напряжение источника питания U' приложено к транзистору T, в коллекторной цепи которого включено сопротивление нагрузки $R_н$. Напряжение на нагрузке $U'_н$ определяется током коллектора транзистора, протекающим через сопротивление нагрузки. Напряжение $U_н$ прило-

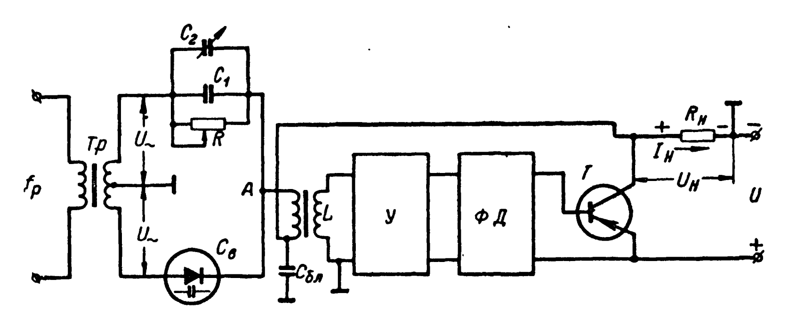


Рис. 19. Схема для стабилизации малых постоянных напряжений.

жено в запорном направлении к варикапу, который включен в одно из плеч мостовой схемы.

Пусть вначале напряжение $U_н$ равно номинальному и при этом мост немного разбалансирован. Напряжение разбаланса усиливается резонансным усилителем *У*, настроенным на частоту раскачки, а затем детектируется фазовым детектором *ФД*. Нагрузкой фазового детектора является цепь базы транзистора *Т*. Ток базы управляет током коллектора, величина тока коллектора соответствует номинальному значению напряжения $U'_н$.

Пусть теперь напряжение $U_н$ возросло (например, вследствие возрастания напряжения источника питания U'), что привело к уменьшению емкости варикапа. При этом разбаланс моста уменьшается, что приводит к уменьшению тока базы транзистора *Т*, а следовательно, и к уменьшению тока коллектора. Уменьшение тока коллектора препятствует возрастанию напряжения на нагрузке.

Аналогично при уменьшении напряжения источника питания возрастание тока коллектора препятствует уменьшению напряжения на нагрузке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В большой семье полупроводниковых приборов появился младший собрат — варикап. Несмотря на свою молодость, он уверенно входит в радиоэлектронику. Применение варикапов далеко не исчерпывается примерами, приведенными в этой книге. Варикапы используются также для частотной модуляции *RC* и *LC* автогенераторов, для электронной перестройки фильтров, в схемах автоматического поиска радиоприемником передающей станции, в триггерных схемах, в схемах регулируемой задержки и др. Во многих вычислительных машинах используются параметроны — генераторы параметрических колебаний на варикапах.

В ближайшие годы получат широкое применение фотоварикапы, так как они позволяют сочетать в одном полупроводниковом приборе преобразование светового сигнала в электрический и параметрическое усиление электрического сигнала; в частности, перспективным является использование фотоварикапов в схемах автоматики, управляемых световыми сигналами:

Разумеется, трудно предсказать новые возможности применения варикапов: здесь широкий простор для поисков и находок, и многое зависит от радиолюбительской пытливости и настойчивости.

ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТИ НЕКОТОРЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ ОТ ПОСТОЯННОГО ЗАПИРАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

(емкость в пикофарадах)

Тип диода	Напряжение, *в*								
	0	0,1	0,3	0,6	1,5	5,0	15	40	60
Д1	3,4	1,6	1,1	0,8	0,6	0,58	0,55	0,45	—
Д2Б	1,45	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25	0,21	—
ДГ-Ц27	80	52	42	35	26	10	7	5	—
Д202	78	75	72	64	56	42	27	10	—
Д231	980	900	830	780	740	700	650	600	570
Д810	400	330	280	260	230	120	—	—	—
Д813	370	320	250	220	210	100	—	—	—
Д815	680	630	570	520	470	420	—	—	—
Д816	620	580	530	480	420	370	320	—	—
Д817	570	520	470	400	350	300	260	220	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВАРИКАПОВ

Параметры	Тип варикапа					
	Д901А	Д901Б	Д901В	Д901Г	Д901Д	Д901Е
Максимальное напряжение, $U_{макс}$, *в*, при $+20°$ С	80	45	80	45	80	45
Обратный ток $I_{обр}$ (не более), *мка*:						
при $+20°$ С	1	1	1	1	1	1
при $+125°$ С	25	25	25	25	25	25
Номинальная емкость $C_{ном}$, *пф*, при напряжении смещения $U=4$ *в* и температуре $+20°$ С	22—32	22—32	28—38	28—38	34—44	34—44
Коэффициент перекрытия по емкости $K_п$	4	3	4	3	4	3
Температурный коэффициент емкости ТКЕ (не более), 1/*град*, в интервале температур от -60 до $+125°$ С:						
при напряжении $U=4$ *в*	$500\cdot10^{-6}$	$500\cdot10^{-6}$	$500\cdot10^{-6}$	$500\cdot10^{-6}$	$500\cdot10^{-6}$	$500\cdot10^{-6}$
при напряжении $U=40$ *в*	$200\cdot10^{-6}$	$200\cdot10^{-6}$	$200\cdot10^{-6}$	$200\cdot10^{-6}$	$200\cdot10^{-6}$	$200\cdot10^{-6}$
Добротность диода Q (не менее) при $U=4$ *в*, на частоте $f=50$ *Мгц* при $+20°$ С	25	30	25	30	25	30
Максимально допустимая мощность $P_{макс}$, *мвт*, в интервале температур от -60 до $+25°$ С	250	250	250	250	250	250

Примечания: 1. При температуре свыше $+25°$ С мощность уменьшается на 2 *мвт* через каждый 1° С. 2. При температуре $+25°$ С величина добротности снижается в 2,5 раза.

Основное применение высокочастотных варикапов — перестройка резонансной частоты контура в схемах АПЧ, ЧМ, параметрических усилителях и др.

Оформлены в металлическом герметическом корпусе.

Вес варикапа 0,65 *г*.

Предельные эксплуатационные данные

Интервал рабочих температур от —60 до +125° С. Относительная влажность при температуре +40° С до 98%.
Атмосферное давление от 5 *мм рт. ст.* до 3 *ат*.
Постоянные и ударные ускорения до 150 *g*.
Вибрация с ускорением до 15 *g* в диапазоне частот от 5 до 2 000 *гц*.
Срок службы не менее 5 000 *ч*.

Указания по эксплуатации

При работе в схеме в качестве переменной емкости варикап должен быть включен полярностью, обратной по отношению к указанной на его корпусе.

Варикапы припаиваются к элементам схем паяльником мощностью 60 *вт* в течение 2—3 *сек* на расстоянии не ближе 5 *мм* от корпуса с обязательным теплоотводом между местом пайки и корпусом прибора. В качестве теплоотвода можно применять пинцет с плоскими губками шириной не менее 2,5 *мм*, толщиной не менее 2 *мм*. Диоды припаиваются оловянно-свинцовым припоем ПОС-61. Температура корпуса прибора не должна превышать +140° С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТИ НЕКОТОРЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ОТ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ[1]

Тип транзистора	Используемый переход[1]	Напряжение, *в*						
		0	0,1	0,3	0,6	1,5	5,0	10,0
П-14	К—Б	—	80	64	52	40	26	22
	Э—Б	—	80	65	52	36	22	16
П105	К—Б	150	138	122	104	80	45	30
	Э—Б	68,6	62	55	46	35	15	
П403	К—Б	22,5	14	11	9	7,5	5	4,5
	Э—Б	72	66,5	59	54	49		
П405А	К—Б	10	7	6	5	4	3	2
	Э—Б	5,5	4	3,5	3,2	2,4	2,0	
П408	К—Б	26	24	20	17	13	8	6,5
	Э—Б	38	32	26	21	16	10	7
П411	К—Б	10	7,5	5,8	5,4	4,5	4,0	3,2
	Э—Б	10	9,8	8,8				

[1] В транзисторе используется один из *p-n* переходов: коллектор — база (К — Б) или эмиттер — база (Э — Б) при запирающем напряжении.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ФОТОДИОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ КАК ФОТОВАРИКАПЫ

При использовании полупроводникового фотодиода как фотоварикапа он должен иметь (помимо высокой чувствительности к свету) высокую добротность в рабочем диапазоне частот (см. § 3).

В качестве низкочастотных фотоварикапов можно использовать кремниевые фотоэлементы, предназначенные для преобразования солнечной энергии в электрическую (так называемые солнечные батареи). Их емкость (при $U=0$) лежит в пределах от нескольких тысяч пикофарад до нескольких десятых долей микрофарад в зависимости от площади *p-n* перехода. Зависимость их от фото- э. д. с. и фототока короткого замыкания от мощности светового потока приведена на рис. 12. Рабочий диапазон частот лежит в пределах от нескольких сот герц до нескольких десятков килогерц. Темновой ток этих фотоэлементов быстро возрастает с увеличением обратного напряжения, поэтому максимальное обратное напряжение не превышает 5 *в*.

На низких частотах в качестве фотоварикапов можно использовать также кремниевые фотодиоды ФДК-1. Их емкость (при $U=0$) примерно 80 пикофарад. Интегральная чувствительность 3 *ма/лм*. При обратном напряжении 20 *в* и при комнатной температуре темновой ток не превышает 3 *мка*. Эти фотодиоды имеют высокое последовательное сопротивление, поэтому их верхняя граничная частота, несмотря на малую емкость, не превышает 100—150 *кгц* (см. формулу 10 и пояснения к ней).

В диапазоне от нескольких десятков килогерц до нескольких мегагерц в качестве фотоварикапов можно использовать германиевые фотодиоды ФД-1. Их емкость (при $U=-0{,}5$ *в*) 110—120 *пф*. Интегральная чувствительность 14—20 *ма/лм*. При обратном напряжении 15 *в* темновой ток не превышает 20 *мка*.

ЛИТЕРАТУРА

Вербицкая Т. Н. Вариконды. Массовая радиобиблиотека, вып. 318, Госэнергоиздат, 1958.

Справочник по полупроводниковым диодам и транзисторам. Под ред. Н. Н. Горюнова. изд-во «Энергия», 1964.

Василькевич И. и Покровский Ф. Полупроводниковый диод — управляемый конденсатор (свойства и особенности применения), «Радио», 1961, № 8, стр. 20—23.

5. Василькевич И. и Покровский Ф. Электронная настройка радиовещательных приемников, «Радио», 1961, № 11, стр. 47—48.

Схема автоподстройки частоты для транзисторных приемников с частотной модуляцией, «Радио», 1963, № 4, стр. 60.

Перцов С. В. Параметрические усилители. Массовая радиобиблиотека, вып. 442, Госэнергоиздат, 1962.

Туркулец В. И. и Удалов Н. П. Фотодиоды и фототриоды. Библиотека по автоматике, вып. 64, Госэнергоиздат, 1962 г.

СОДЕРЖАНИЕ